

–
Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

ÉTUDE DES POTENTIALITÉS DES CIMENTS SULFO-ALUMINEUX POUR INHIBER LA RÉACTION ALCALI-SILICE

KLEIB Joelle^{A,B}, AOUAD Georges^C, LOUIS Ghislain^A, ZAKHOUR Mirvat^B, BOULOS Madona^B, ROUSSELET Angélique^A, BULTEEL David^A

^A : IMT Lille Douai, Univ. Lille, EA 4515 – LGCgE – Laboratoire de Génie Civil et géoEnvironnement, Département Génie Civil & Environnemental, F-59000 Lille, France

^B : Laboratoire de Chimie Physique des Matériaux (LCPM/PR2N), EDST, Université Libanaise, Faculté des Sciences II, Département de Chimie, Fanar, Liban

^C : Faculty of Engineering, University Of Balamand, UOB, Al Koura, Lebanon

Résumé : La Réaction Alkali-Silice (RAS) est une des pathologies qui affecte la durabilité du béton. Le résultat de cette réaction est le gonflement du béton. À ce jour, l'essentiel des travaux concernant la RAS reposent sur l'utilisation du ciment Portland (OPC). L'objectif de cette étude est de voir si le ciment sulfoalumineux (CSA) peut être une alternative à l'OPC lors de l'utilisation des granulats réactifs. Le ciment CSA est connu pour sa faible teneur en alcalins et son pH plus faible que celui de l'OPC dans la solution interstitielle de sa matrice cimentaire. Ces deux caractéristiques sont connues pour influencer la RAS. Dans ce but, un granulats réactif qu'est le silice a été utilisé dans cette étude pour initier le phénomène de la RAS avec deux types de ciment : le ciment Portland CEMI 52,5 de Holcim et le ciment sulfoalumineux Alpenat de Vicat. Les alcalins ont été ajoutés dans la solution de gâchage par un dopage NaOH ou NaCl. Six mortiers ont été confectionnés : deux références formées à partir du ciment CSA ou d'OPC et sans ajout de quantités supplémentaires d'alcalins alors que les quatre autres mortiers (à base d'OPC ou CSA) sont dopés soit avec NaOH soit NaCl. Les résultats sur les mortiers de référence montrent qu'aucune expansion/altération n'est détectée durant la durée du test de 140 jours. Le test de RAS sur le mortier à base de CSA est applicable avec NaCl et non pas avec NaOH. Le changement de la source d'alcalins (NaOH ou NaCl) - tout en gardant le même pourcentage de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ dans les mortiers à base de l'OPC n'a pas un effet considérable sur l'expansion. Les mesures d'expansion des mortiers dopés en alcalins, montrent que l'utilisation du ciment CSA réduit par sept la valeur d'expansion par rapport à l'OPC. Les analyses de microstructures montrent que la fréquence des altérations, dues à la RAS, est beaucoup moins importante dans les mortiers avec le CSA qu'avec l'OPC.

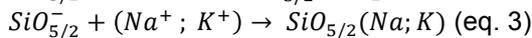
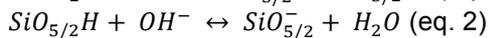
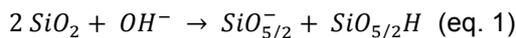
Mots-clés : réaction alcali silice, alcalins, ciment, sulfoalumineux, Portland, expansion.

—
Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

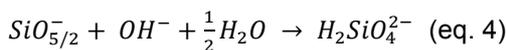
1. INTRODUCTION

La réaction alcali-silice RAS est une réaction chimique nuisible à la durabilité des structures en béton. Cette réaction a lieu entre les bases alcalines - présentes dans la solution interstitielle de la pâte de ciment hydratée - et la silice réactive (mal cristallisée) présente dans certains types de granulats utilisés dans le béton (Poole 1992 ; Rajabipour et al. 2015 ; Kim et al. 2015). L'association de ces éléments dans un environnement ayant une humidité relative élevée (supérieure à 70%) induit la formation des produits expansifs appelés gels silico-alcalins. Le développement de cette pathologie provoque la fissuration et la dégradation des ouvrages en bétons. Différentes théories expliquent la cause du gonflement et de la fissuration du béton, comme la théorie de la pression de cristallisation (Dron 2000), de double couche électrique (Rodriguez et al. 1999) et la théorie de la pression osmotique ou pression d'imbibition (Dent Glasser 1979 ; Aquino et al. 2001). Différents modèles ont été décrits dans la littérature pour définir le mécanisme réactionnel de la RAS (Poole 1992 ; Rodriguez et al. 1999, Wang et Gillot 1991 ; Garcia-Diaz et al. 2006 ; Thomas 2011). Ce processus est résumé par trois étapes essentielles (Bulteel et al. 2004) :

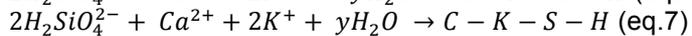
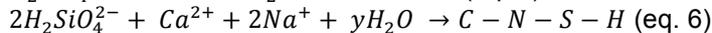
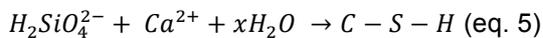
Étape 1 : La première étape de la RAS est lorsque la forme réactive de la silice entre en contact avec la solution alcaline de la pâte de ciment hydratée. Les ions OH^- présents dans la solution porale attaquent les groupements silanols et siloxanes du granulat réactif (eq. 1,2 et 3)



Étape 2 : Formation de la silice dissoute suite à la poursuite de l'attaque des groupements silanols (eq.4)



Étape 3 : Précipitation de la silice dissoute par les cations de la solution porale du béton entraîne la formation des phases C-S-H et/ou C-(N, K)-S-H (eq. 5, 6 et 7)



La présence de la Portlandite est considérée comme un facteur important qui a une influence sur la progression de la RAS, vu qu'elle présente un réservoir des ions OH^- et Ca^{2+} . Par conséquent, les alcalins incorporés dans le gel silico-alcalin seront substitués par les ions Ca^{2+} , ce qui les rend de nouveau disponibles pour la réaction (Krivenko et al. 2014).

Plusieurs études ont été menées pour inhiber la RAS et pour donner des recommandations afin de réduire les effets néfastes de cette réaction comme par exemple l'utilisation des ciments pauvres en alcalins, l'incorporation des additions minérales comme la fumée de silice, les pouzzolanes (Aquino et al. 2001, Thomas 2011 ; Wei et al. 2006) ou encore l'addition du lithium (Bulteel et al. 2010 ; Zapala-Slaweta et Owsiak 2016). Une autre étude montre que l'augmentation de la teneur en aluminium dans la solution poreuse du ciment OPC - par ajout du Metakaolin riche en aluminium - peut réduire la dissolution de la silice mal cristallisée en s'adsorbant sur la surface de cette dernière empêchant donc le développement de la RAS (Chappex et Scrivener 2012a, Chappex et Scrivener 2012b).

–
Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

L'objectif de cet article est de vérifier si la composition d'une pâte de ciment CSA peut réduire la RAS d'un granulats connu pour être réactif avec un ciment OPC. Jusqu'à ce jour, le comportement du ciment CSA vis-à-vis de la RAS n'a pas été étudié. Ce ciment paraît intéressant pour réduire la RAS grâce aux caractéristiques suivantes :

- Les ciments CSA sont connus pour contenir des quantités minimales d'alcalins, par conséquent la quantité de ces derniers apportés par le ciment CSA est négligeable (Ioannou et al. 2015).
- La quantité de Portlandite produite durant l'hydratation du ciment CSA est très faible vu l'absence de C_3S et la faible teneur en C_2S (Berger et al. 2013).
- Par conséquent, le pH de la solution interstitielle d'une matrice cimentaire à base de ciment CSA est très faible par rapport à celui du ciment OPC (Zhou et al. 2006 ; Garcia-Maté et al. 2012). Le faible pH de la solution porale du ciment CSA peut présager que la RAS sera moins importante avec ce type de ciment.

Ce travail de recherche a pour but de vérifier en premier temps si le test utilisé pour étudier la RAS sur des mortiers avec le ciment OPC est applicable aux mortiers à base de ciment CSA. Puis dans un second temps, il s'agit d'étudier l'effet du ciment CSA sur l'inhibition potentielle de la RAS. Dans ce cadre, les conditions expérimentales doivent être adaptées dans le but d'étudier – d'une façon comparative – la RAS dans les mortiers confectionnés soit avec de l'OPC soit avec le ciment CSA.

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

2.1. Matériaux

2.1.1. Granulats réactifs utilisés

Le Silex de Conchil le Temple est le granulats réactifs qui est utilisé tout au long de cette étude. Ce granulats a été déjà décrit par la littérature comme étant réactifs lors de son utilisation avec le ciment OPC (Bulteel et al. 2004 ; Bulteel et al. 2002). La fluorescence X réalisée sur ce granulats révèle une composition de 99% de SiO_2 et la diffraction des rayons X détecte la présence uniquement du quartz. Ce dernier est présent essentiellement sous les formes microcristalline, cryptocristalline et calcédoine. Ces phases sont connues pour être très réactives vis-à-vis de la RAS. Le silex est réduit à une distribution granulométrique de 0,16/5mm par concassage et broyage dans le but de constituer le sable entrant dans la composition du mortier. Les fractions obtenues sont lavées avec de l'eau afin d'éliminer les fines qui peuvent avoir évidemment une influence sur la RAS. Le sable reconstitué à partir de silex est enfin séché à 100°C pendant 24h.

2.1.2. Matériaux cimentaires

Deux types de ciment ont été utilisés dans ce travail. Le ciment Portland CEM I 52,5 N de Holcim (OPC) et le ciment sulfoalumineux Alpenat de Vicat (CSA) ($C_4A_3\dot{S}$: 41,8 % ; C_2S : 22,4 % ; C_3FT : 7,16 % ; $C\dot{S}$: 18 % ; filler calcaire : 5 % ; C_3MS_2 : 3,46 % ; autre 2,18 %). Les tableaux 1 et 2 montrent la composition en oxydes du ciment OPC et du ciment CSA respectivement. La teneur en alcalins (Na_2O_{eq}) dans le ciment CSA est 2 fois plus faible que celle dans le ciment OPC. Cette valeur correspond à 0,34 et 0,77 pourcent en masse de Na_2O_{eq} pour le ciment CSA et le ciment OPC respectivement, d'après leur teneur en alcalins et l'application de l'éq. 8.

$$Na_2O_{eq} = Na_2O + 0,658 \times K_2O \text{ (eq. 8)}$$

Où Na_2O_{eq} représente le pourcentage massique en oxyde de sodium équivalent, Na_2O le pourcentage massique en oxyde de sodium et K_2O le pourcentage massique en oxyde de potassium.

-
Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

Oxydes	Perte au feu	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃
Pourcentage %	1,4	20,0	5,1	3,2	64,5	0,8	3,2
Oxydes	K₂O	Na₂O	S⁻	Cl⁻	CO₂	CaO libre	Na₂O_{eq}
Pourcentage %	0,82	0,23	0,01	0,06	1,0	2,0	0,77

Tableau 1 : Composition en oxydes du ciment Portland CEM I 52,5 de Holcim

Oxydes	Perte au feu	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃
Pourcentage %	0,23	10,55	23,46	9,70	45,07	1,00	8,07
Oxydes	K₂O	Na₂O	TiO₂	P₂O₅	Mn₂O₃	SrO	Na₂O_{eq}
Pourcentage %	0,27	0,17	1,29	0,11	0,01	0,06	0,34

Tableau 2 : Composition en oxydes du ciment sulfoalumineux Alpenat de Vicat

2.2. Méthodes

2.2.1. Conception des mortiers

La confection des éprouvettes de mortiers est basée en partie sur l'essai mortier décrit dans la norme AFNOR P 18-594 (AFNOR NF 18-594. 2015) avec quelques modifications concernant la composition de la solution de gâchage et des cures subit par le matériau. Selon ce test, NaOH est ajouté à la solution de gâchage afin d'augmenter le pourcentage de Na₂O_{eq} et initier la RAS. Dans la littérature, ce test a été utilisé avec des mortiers à base d'OPC. Dans l'étude actuelle, NaOH est ajouté dans la solution de gâchage pour tester la faisabilité de ce test avec le ciment CSA. Le pourcentage de Na₂O_{eq} dans le mortier est équivalent à 2,83% (Rousselet 2016) tout en considérant la quantité de Na₂O_{eq} provenant du ciment. Cependant une autre source d'alcalins est aussi testée en ajoutant de NaCl au lieu de NaOH dans la solution de gâchage tout en gardant le même pourcentage de Na₂O_{eq} (2,83%). L'applicabilité du test avec NaCl est opérée sur les deux types de ciment. Par conséquent, six formulations de mortiers ont été confectionnées. Deux références, avec de l'eau déminéralisée et sans aucun dopage d'alcalins, donc la seule source de ces derniers est le ciment. Ces deux formulations sont référées par OPCref et CSAref pour les mortiers avec OPC et CSA respectivement. Les quatre autres formulations représentent ceux dopés avec 2,83% Na₂O_{eq}, ajoutés en tant que NaOH ou NaCl. Le tableau 3 résume la composition de chaque formulation.

Les rapports eau/ciment (E/C) et ciment/sable (C/S) sont tous les deux équivalents à 0,5. La coupe granulaire du sable reconstitué et le pourcentage de chaque classe dans le mortier est représentée dans le tableau 4.

Références	Type du ciment	Solution de gâchage	Na ₂ O _{eq}
OPCref	OPC	Eau déminéralisée	0,77
CSAref	CSA	Eau déminéralisée	0,34
OPC2,83(NaOH)	OPC	solution NaOH	2,83
CSA2,83(NaOH)	CSA	solution NaOH	2,83
OPC2,83(NaCl)	OPC	solution NaCl	2,83
CSA2,83(NaCl)	CSA	solution NaCl	2,83

Tableau 3 : Composition des mortiers utilisés dans l'étude de la RAS

–
Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

Classe granulaire (mm)	Pourcentage dans le mortier %
0,16/0,315	10
0,315/0,63	10
0,63/1,25	25
1,25/2,5	25
2,5/5,0	30
Total	100

Tableau 4 : Coupe granulaire du sable reconstitué et le pourcentage de chaque classe dans le mortier

Les éprouvettes de mortiers sont préparées dans des moules 40*40*160mm selon le protocole décrit dans la norme AFNOR NF EN 196-1 (AFNOR NF EN 196-1 2006). Trois éprouvettes de chaque formulation sont confectionnées. Les éprouvettes sont conservées durant 24h à 20°C et une humidité relative (HR) de 100%. Ensuite après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans des bacs à 60°C et 100% HR.

2.2.2. Tests réalisés

Le test d'expansion est réalisé à l'aide d'un retractomètre. Pour chaque formulation, les mesures d'expansion sont prises sur trois éprouvettes et l'expansion correspond à la moyenne des trois mesures. La mesure initiale correspond à celle mesurée juste après le démoulage et avant la mise dans les bacs à 60°C. La mesure se fait ensuite chaque 14 jours. L'expansion ε des éprouvettes est calculée comme suit :

$$\varepsilon = (l - l_0)/L_{ref} \text{ (eq.9)}$$

Avec L_{ref} la longueur de référence (160 mm), l_0 l'allongement initial et l l'allongement au temps t .

Des analyses de diffraction des rayons X (DRX) et thermogravimétriques (ATG/DTG) afin de déterminer la composition en phases dans chaque mortier sont également réalisées.

Enfin une étude de la microstructure est réalisée en utilisant un Microscope Electronique à Balayage MEB de type Hitachi S-4300SE/N couplé à un spectromètre X par Dispersion en Energie EDS, dans le but de faire de l'imagerie et des analyses chimiques locales pour évaluer l'altération ou non des différents mortiers par la RAS.

3. RÉSULTATS

3.1. Dopage de la solution de gâchage des mortiers CSA avec différentes sources d'alcalins

Le test sur mortier à base de ciment OPC pour identifier la RAS utilise du NaOH comme source d'alcalins. Or il n'a pas été identifié des travaux antérieurs appliquant ce test sur les mortiers à base de ciment CSA. En conséquence, un test est fait avec le ciment CSA en ajoutant des alcalins dans la solution de gâchage provenant soit de NaOH soit de NaCl.

3.1.1. Ajout de NaOH dans la solution de gâchage

Pour tester la faisabilité du test conventionnel de la RAS - qui utilise le NaOH comme source d'alcalins – le mortier CSA2,83(NaOH) est confectionné en utilisant le ciment CSA, le granulats siliceux et une solution contenant une teneur en NaOH afin d'avoir un pourcentage de 2,83 de Na_2O_{eq} dans le mortier (en prenant compte de la concentration d'alcalins apportée par le ciment). Quelques secondes après

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

le début du malaxage, une agglomération et une perte d'ouvrabilité sont observées rendant la mise en œuvre impossible. Le test avec NaOH n'est donc pas applicable avec le ciment CSA.

3.1.2. Ajout de NaCl dans la solution de gâchage

Le même protocole appliqué précédemment avec NaOH est appliqué avec NaCl. Le mortier avec NaCl correspond à CSA2,83(NaCl). Lors du malaxage de ce dernier aucun problème d'ouvrabilité ou de mise en œuvre n'est constaté. Par conséquent, pour étudier la RAS avec du ciment CSA, NaCl doit être utilisé comme source d'alcalins au lieu de NaOH.

3.2. Dopage de la solution de gâchage des mortiers OPC avec différentes sources d'alcalins

3.2.1. Ajout de NaCl dans la solution de gâchage

Il a été démontré dans la partie précédente que le sodium doit être ajouté en tant que NaCl avec le ciment CSA. Pour être cohérent dans la comparaison, il est donc nécessaire de vérifier la faisabilité du test avec NaCl lors de l'utilisation du l'OPC. Le mortier OPC2,83(NaCl) est donc fabriqué avec de l'OPC, du silex et une solution de gâchage contenant une quantité de NaCl afin d'avoir un pourcentage de 2,83 de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ dans le mortier. Comme pour CSA2,83(NaCl), aucun problème de mise en œuvre n'est observé.

3.2.2. Étude de l'effet de la source alcaline sur l'expansion du mortier OPC

L'applicabilité du test avec NaCl étant confirmée, l'effet de la source d'alcalins sur l'expansion des mortiers OPC est étudié. Dans ce but, deux mortiers sont préparés : un mortier OPC2,83(NaOH) et un mortier OPC2,83(NaCl) avec un dopage respectivement en NaOH et NaCl et présentant le même pourcentage $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$. La figure 1 montre qu'en modifiant la source d'alcalins, l'expansion à 105 jours est du même ordre de grandeur avec des valeurs de 0,71 et 0,76% pour OPC2,83(NaOH) et OPC2,83(NaCl) respectivement. L'écart de pH (non mesuré dans notre étude) qu'il doit exister entre ces deux formulations (substitution de NaOH par NaCl) ne semble pas avoir d'impact sur l'expansion dans les conditions testées.

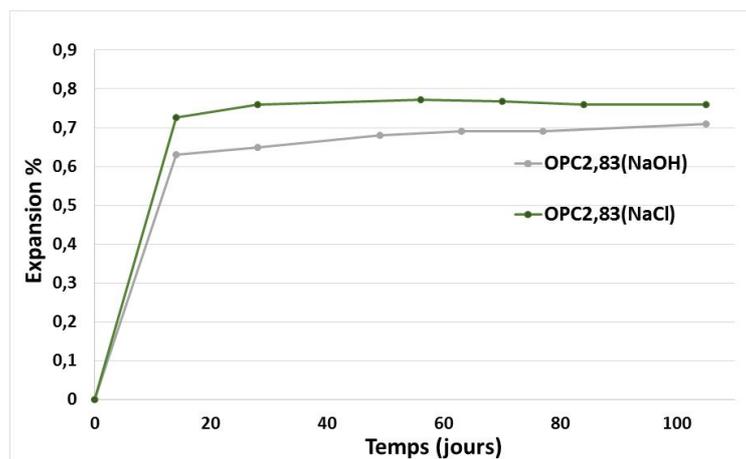


Figure 1 : L'expansion des mortiers OPC avec différentes sources d'alcalins (NaOH et NaCl)

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

3.3. Effet du type du ciment sur l'évolution de la RAS

3.3.1. Test d'expansion

Dans les paragraphes précédents, une méthode pour comparer le développement de la RAS sur mortiers à base d'OPC et de ciment CSA a été adaptée en utilisant NaCl comme source d'alcalins. La figure 2 représente l'évolution de l'expansion en fonction du temps des 4 mortiers, sans et avec ajout de NaCl, dans le but d'étudier l'effet du type du ciment sur le développement de la RAS. Les résultats montrent que pour les deux références, OPCref et CSAref aucune expansion n'est détectée lors de la durée de test (280 jours). Dans le cas du mortier OPCref malgré la teneur en alcalin dans le ciment OPC à cette échéance (280 jours) il n'y a pas d'expansion comme l'a montré Rousselet (Rousselet 2016). En revanche, le mortier OPC2,83(NaCl) présente une forte expansion de 0,73% à 14 jours. Cette expansion est 20 fois supérieure à celle pour CSA2,83(NaCl) qui est très modérée à 0,04%. Après 280 jours, l'expansion d'OPC2,83(NaCl) augmente légèrement pour atteindre 0,76%. Alors que la valeur de CSA2,83(NaCl) reste minimale. Cette dernière est 7 fois plus faible que l'expansion observée dans le mortier OPC2,83(NaCl).

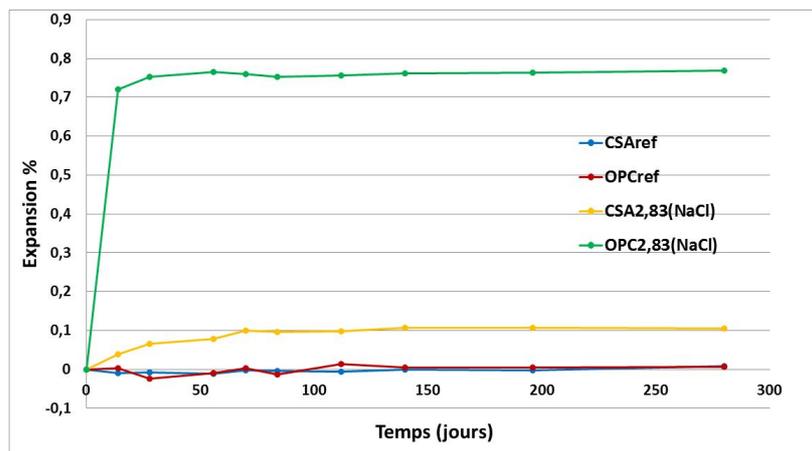


Figure 2 : Expansion des mortiers à base d'OPC et du ciment CSA, sans et avec ajout de NaCl
3.3.2. Caractérisation des mortiers par diffraction des rayons X

Dans le but de déterminer la différence des hydrates produits dans chacun des deux mortiers – OPCref et CSAref – une analyse par DRX est faite sur ces deux mortiers. Les diffractogrammes de la figure 3 montrent que l'hydrate essentiel produit dans OPCref est la Portlandite (en plus du C-S-H non détectable par DRX), alors que pour CSAref c'est l'ettringite qui présente le produit majeur d'hydratation. Vu que les analyses sont faites sur les mortiers, un pic correspondant au quartz du sable siliceux apparaît dans les deux diffractogrammes. De même, des analyses DRX sont menées sur les mortiers avec NaCl (non présentées ici). Les résultats de ces derniers montrent une seule différence par rapport aux mortiers sans NaCl, qui est la présence du chloroaluminate de calcium (sel de Friedel) qui est liée au dopage par NaCl.

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

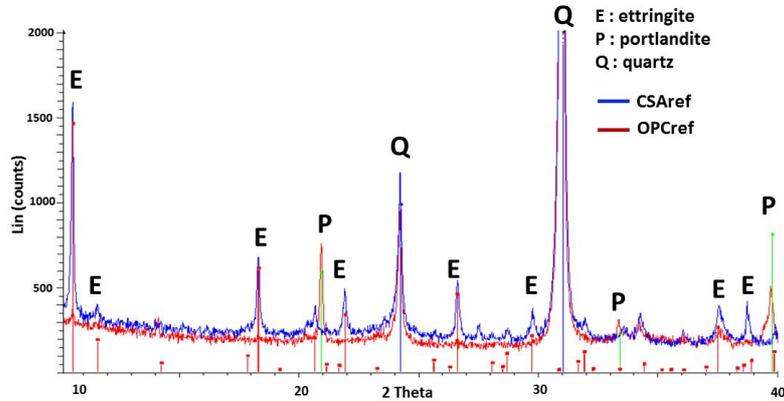


Figure 3 : Diffractogrammes des mortiers OPCref et CSAref

3.3.3. Analyse thermogravimétrique ATG/DTG des mortiers

Comme évoqué dans l'introduction, la présence de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est considérée comme un facteur important dans le développement de la RAS. Pour cela une analyse thermogravimétrique est faite dans le but de quantifier la teneur en portlandite dans chaque mortier. La température de dégradation de cette phase se situe vers $\pm 450^\circ\text{C}$ comme la dérivée thermogravimétrique le montre (fig. 4). Pour le mortier OPCref (fig. 4a), l'ATG montre une inflexion à cette température avec une perte de masse qui correspond à 1,51%. Cela est couplé à la perte en eau comme le montre le spectre de spectrométrie de masse de l'eau. Cette perte de masse correspond à 6,2% de portlandite. Par contre pour CSAref (fig. 4b), l'ATG ne montre aucune inflexion à 450°C et aucun pic n'est observé à cette température en DTG et spectrométrie de masse de l'eau, signifiant l'absence de la portlandite dans ce mortier.

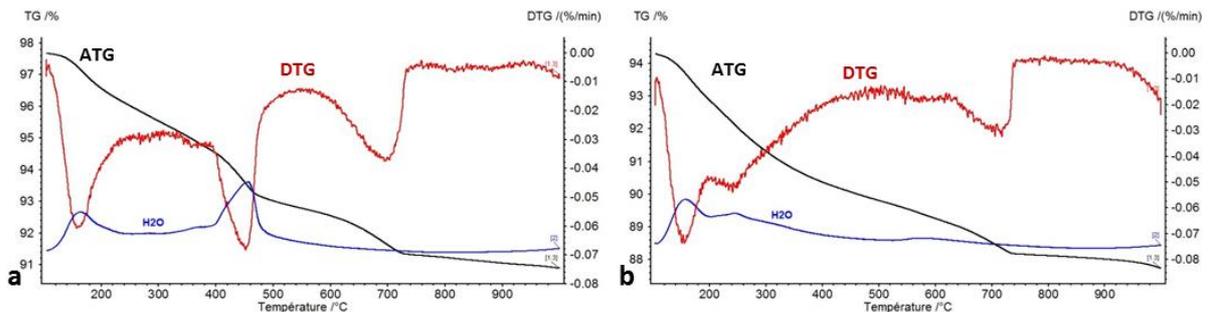


Figure 4 : Courbes ATG/DTG et spectre de l'eau par spectrométrie de masse (couplé à l'ATG) des mortiers de référence OPCref(a) et CSAref (b)

3.3.4. Observation de la microstructure des mortiers par MEB/EDS

La figure 5 présente les observations MEB/EDS sur des sections polies de mortier pour les 2 références OPCref (fig. 5a) et CSAref (fig. 5b). Ces observations montrent que la détérioration n'est pas significative dans ces deux références. Ainsi que ce n'est pas le cas pour le mortier OPC2,83NaCl comme le montre la figure 6a. Dans cette dernière, une dégradation de microstructure est observée avec une fréquence élevée. En effet, tous les critères liés à la RAS apparaissent : des fissures au niveau des granulats de silex et de la matrice cimentaire, de même une formation du gel de silice dans les granulats (fig. 6a point 1) et dans la pâte de ciment (fig. 6a point 2). L'analyse EDS révèle la

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

présence des alcalins (Na et K) ainsi que le Ca et le Si qui sont les éléments essentiels pour la formation du gel de silice.

Par contre pour le mortier CSA2,83(NaCl), la détérioration est beaucoup moins fréquente que celle observée dans OPC2,83(NaCl). Quelques fissures sont observées au niveau des grains de silex et de la pâte de ciment. Contrairement à OPC2,83(NaCl), peu ou pas de formation de gel dans CSA2,83(NaCl). Les analyses EDS réalisées sur ce dernier (pointées 3 et 4 de la fig.6b) montrent l'adsorption de l'aluminium sur le grain de silice en cours d'altération (pointée 3)

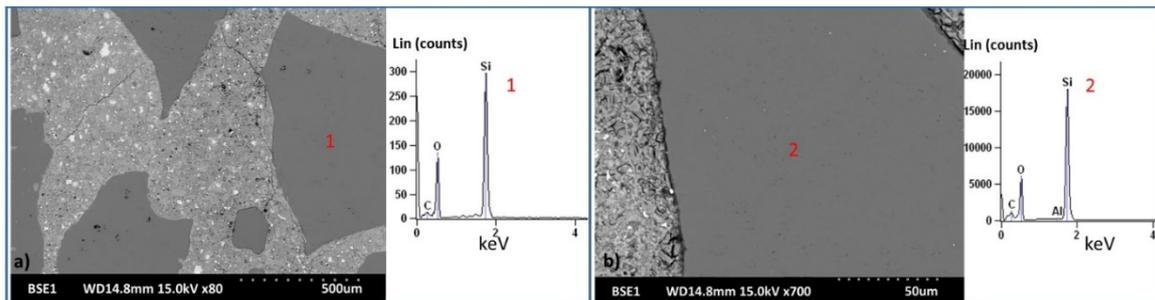


Figure 5: Observations MEB/EDS réalisées sur des sections polies des mortiers OPCref (a) et CSAref (b)

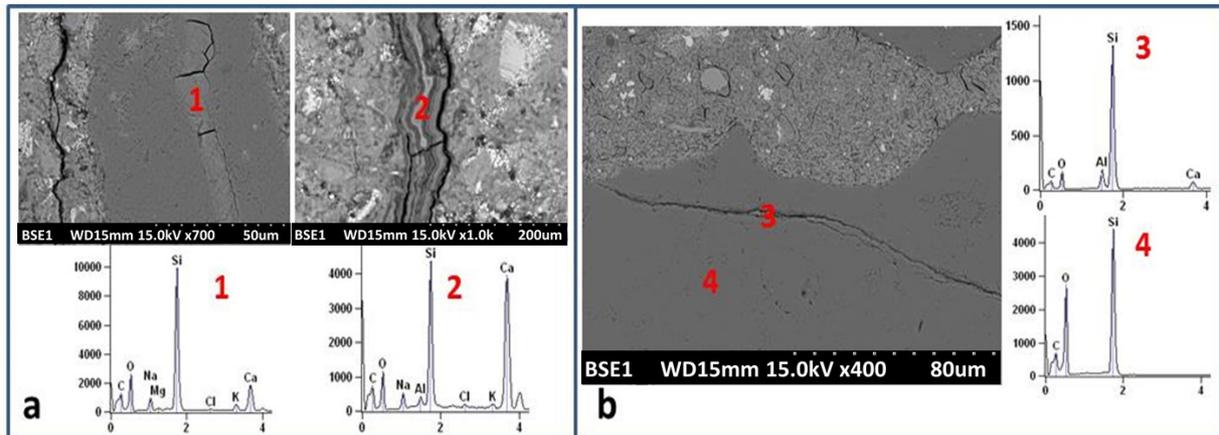


Figure 6 : Observations MEB/EDS réalisées sur des sections polies des mortiers OPC2,83NaCl (a) et CSA2,83NaCl (b)

4. DISCUSSIONS

Les premiers essais ont montré que le test normalisé avec NaOH n'est pas applicable avec le ciment CSA et en plus il est non pertinent puisque son application fait perdre l'avantage du faible pH du ciment CSA. Par conséquent, le test d'identification de la RAS a été adapté par l'introduction du sodium sous forme de NaCl.

L'étude d'expansion réalisée sur les mortiers à base du ciment OPC dopés aux alcalins soit par l'introduction de NaOH soit de NaCl, montrent un effet minime de la source d'alcalins sur l'expansion des mortiers. Par conséquent le test avec NaCl sur mortier à base d'OPC est validé.

Les mesures d'expansion montrent que le mortier CSA est 7 fois moins expansif que le mortier OPC. Les observations de la microstructure par MEB/EDS confirment ce résultat en révélant un plus grand degré de détérioration dans les mortiers OPC que dans ceux avec le ciment CSA quand ils sont dopés en alcalins. Ces analyses révèlent d'une part, des fissurations et des altérations avec une fréquence beaucoup plus élevée dans les mortiers OPC que dans les mortiers CSA, et d'autre part

–
Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

aucune formation de gel dans ce dernier, tandis qu'un gel silico-alcalin dans les grains de sable siliceux du mortier OPC ainsi que dans la pâte de ciment est observé. L'origine de ce comportement est, dans un premier temps, la faible teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans le mortier CSA, comme le montre les analyses DRX et ATG. Cette faible teneur en portlandite est due à l'absence de C_3S dans le ciment CSA. Par suite, le pH de la solution interstitielle de la pâte de ciment CSA est plus faible que celle de l'OPC. Par conséquent, la quantité des ions hydroxydes – qui permet la rupture du réseau siliceux – est faible dans les mortiers à base de ciment CSA.

Dans un second lieu, l'abondance de l'aluminium dans le ciment CSA peut être un facteur inhibiteur de la RAS. Les analyses EDS montrent l'adsorption de l'aluminium sur les grains de silice dans les mortiers CSA. Cet élément a été aussi détecté dans les zones où la dégradation commence à avoir lieu facilitant probablement leur adsorption avant leur effet inhibiteur. L'étude de Chappex et Scrivener(2012) montre le rôle de l'aluminium dans la limitation de la RAS, via leur adsorption sur la surface de la silice limitant ainsi la dissolution de la silice amorphe des granulats (Chappex et Scrivener2012b). La composition des deux ciments (CEM I 52,5 et l'Alpenat) montre que l'aluminium est 4 fois plus abondant dans le ciment CSA que dans l'OPC.

Il est important de noter aussi que le ciment CSA contient des faibles teneurs en alcalins par rapport à l'OPC. Par contre, cette caractéristique n'est pas mise en évidence car l'essai appliqué nécessite l'ajout des quantités d'alcalins supplémentaires pour déclencher la RAS.

5. CONCLUSION

L'objectif principal de cette étude est de vérifier si le ciment CSA peut être un candidat pour la réduction de la RAS d'un granulat connu pour sa réactivité dans les mortiers à base d'OPC. Les expérimentations et les analyses effectuées ont permis de dresser les conclusions suivantes :

- 1- Le protocole expérimental a été adapté dans le but de pouvoir étudier la RAS avec les deux ciments – OPC et CSA – et afin de garder l'avantage de faible pH du ciment CSA.
- 2- L'utilisation de NaCl au lieu de NaOH dans la solution de gâchage montre une variation minimale de l'expansion des mortiers à base d'OPC, ce qui valide le protocole avec NaCl.
- 3- Le ciment CSA est un bon candidat pour l'atténuation de la RAS lors de l'utilisation des granulats réactifs. Les mortiers CSA sont 7 fois moins expansifs que les mortiers OPC. De même, la microstructure des mortiers CSA présente des grains de silice moins détériorés, moins de fissuration et peu ou pas de formation de gel.
- 4- Plusieurs raisons expliquent l'atténuation de la RAS en utilisant le ciment CSA :
 - a. La faible teneur du mortier CSA en $\text{Ca}(\text{OH})_2$, qui est un facteur essentiel pour le développement de la RAS ;
 - b. Le ciment CSA contient moins d'alcalins ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) que l'OPC. Par conséquent, à une échelle réelle, où il n'y a pas d'ajout d'alcalins, cela pourrait être un facteur bénéfique en raison des quantités moindres de NaOH et de KOH générées;
 - c. La composition des pâtes de ciment CSA inclue des phases riches en aluminium comme l'ettringite, ce qui permet à l'aluminium de s'adsorber sur le squelette granulaire siliceux permettant éventuellement de réduire leurs dissolutions et d'atténuer la RAS.

RÉFÉRENCES

- AFNOR NF EN 196-1, "Méthode d'essais des ciments - Partie 1: Détermination des résistances mécaniques," 2006.
- AFNOR NF P18-594., "Granulats - Méthodes d'essai de réactivité aux alcalis," 2015.
- Aquino W., Lange D. A., et Olek J., (2001), The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali - silica reaction products, *Cement and Concrete Composite*, 23 : 485–493.
- Berger S., Aouad G., Cau Dit Coumes C., Le Bescop P. et Damidot D., (2013), Leaching of calcium sulfoaluminate cement pastes by water at regulated pH and temperature : Experimental investigation and modeling, *Cement and Concrete Research*, 53 : 211–220.

—
Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

- Buldeel D. et P. Dégrugilliers, (2010), Influence of lithium hydroxide on alkali – silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 40 : 526–530.
- Buldeel D., Garcia-Diaz E., Vernet C., et Zanni H., (2002), Alkali-silica reaction - A method to quantify the reaction degree, *Cement and Concrete Research*, 32 : 1199–1206.
- Buldeel D., Rafaï N., Degrugilliers P. et Garcia-Diaz E., (2004), Petrography study on altered flint aggregate by alkali-silica reaction, *Materials Characterization*, 53 : 141–154.
- Chappex T. et Scrivener K., (2012a), Alkali fixation of C-S-H in blended cement pastes and its relation to alkali silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 42 : 1049–1054.
- Chappex T. et Scrivener K., (2012b), The influence of aluminium on the dissolution of amorphous silica and its relation to alkali silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 42: 1645–1649.
- Dent Glasser L. S., (1979), Osmotic pressure and the swelling of gels, *Cement and Concrete Research*, 9: 515–517.
- Dron R., (2000), Thermodynamique de la réaction alcali-silice, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, pp. 55–59.
- Garcia-Diaz E., Riche J., Buldeel D., et Vernet C., (2006), Mechanism of damage for the alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 36 : 395–400.
- García-Maté M., Santacruz I., De La Torre Á. G., León-Reina L., et Aranda M. A. G., (2012), Rheological and hydration characterization of calcium sulfoaluminate cement pastes, *Cement and Concrete Composite*, 34 : 684–691.
- Kim T., Olek J., et Jeong H., (2015), Alkali-silica reaction: Kinetics of chemistry of pore solution and calcium hydroxide content in cementitious system, *Cement and Concrete Research*, 71 : 36–45.
- Krivenko P., Drochytká R., Gelevera A., et Kavalerova E., (2014), Mechanism of preventing the alkali-aggregate reaction in alkali activated cement concretes, *Cement and Concrete Composite*, 45 : 157–165.
- Ioannou S., Paine K., Reig L., et Quillin K., (2015), Performance characteristics of concrete based on a ternary calcium sulfoaluminate-anhydrite-fly ash cement, *Cement and Concrete Composite*, 55 : 196–204.
- Poole A. B., (1992), Introduction to alkali–aggregate reaction in concrete, dans *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*, R.N.SWAMY (Blackie and Son), London.
- Rajabipour F., Giannini E., Dunant C., Ideker J. H., et Thomas M. D. A., (2015), Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps, *Cement and Concrete Research*, 76 : 130–146.
- Rodriguez F. A., Monteiro J. M., et Sposito G., (1999), The alkali-silica reaction: the surface charge density of silica and its effect on expansive pressure, *Cement and Concrete Research*, 29 : 527–530.
- Rousselet A., (2016), Inhibition de la réaction alcali-silice par le lithium: efficacité en milieu modèle et en matrice cimentaire et compréhension des mécanismes d'inhibition, Thèse, Université de Lille 1 Sciences et Technologie.
- Thomas M., (2011), The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction : A review, *Cement and Concrete Research*, 41 : 1224–1231.
- Wang H. et Gillot J. E., (1991), Mechanism of alkali –silica reaction and significance of calcium hydroxide, *Cement and Concrete Research*, 21 : 647–654.
- Wei F., Lan X., Lv Y., et Xu Z., (2006), Effect of pozzolanic reaction products on alkali-silica reaction, *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 21 : 168–171.
- Zapala-Staweta J. et Owsiak Z., (2016), The role of lithium compounds in mitigating alkali-gravel aggregate reaction, *Construction and Building Material*, 115 : 299–303.
- Zhou Q., Milestone N. B., et Hayes M., (2006), An alternative to Portland Cement for waste encapsulation-The calcium sulfoaluminate cement system, *Journal of Hazardous Materials*, 136 : 120–129.